

冷喷涂设备及冷喷涂技术应用研究进展

赵国锋^a, 王莹莹^{a,b}, 张海龙^a, 唐鋈磊^a, 陈永东^b

(西南石油大学 a 化学化工学院 b 海洋天然气水合物开发协同创新中心, 成都 610500)

摘要: 冷喷涂技术相比于传统热喷涂技术有许多优势, 例如喷涂温度低, 涂层氧含量低, 孔隙率低, 在喷涂过程中不易发生氧化、烧损、相变等现象, 这使得传统喷涂技术难以制备的氧敏感、热敏感、非晶、纳米材料涂层成为可能。从冷喷涂技术原理出发, 介绍了各类冷喷涂设备及冷喷涂涂层的沉积机理, 详细阐述了冷喷涂涂层结合机理和结合方式(机械咬合、物理结合、冶金结合、化学结合), 介绍了各类冷喷涂装备(高压和低压冷喷涂系统、真空冷喷涂系统、激光辅助冷喷涂系统、静电辅助冷喷涂系统、脉冲气体冷喷涂系统和激波风洞冷喷涂系统)及其研究现状。综述了近几年冷喷涂技术在防腐涂层、耐磨涂层、生物医用、抗菌涂层、电子工业、功能涂层、修复与再制造等领域的应用现状, 最后对冷喷涂技术的应用和发展前景进行了展望。

关键词: 冷喷涂; 涂层; 原理; 设备; 沉积机理

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0198-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.027

Application of Cold Spraying Equipment and Cold Spraying Technology

ZHAO Guo-feng^a, WANG Ying-ying^{a,b}, ZHANG Hai-long^a, TANG Jun-lei^a, CHEN Yong-dong^b

(a.School of Chemistry and Chemical Engineering,

b.Marine Gas Hydrate Development Collaborative Innovation Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: Cold spraying technology has many advantages over traditional thermal spraying technology, such as low spraying temperature, low oxygen content in coating, low porosity, and unlikely occurrence of oxidation, burning loss and phase change in the spraying process. Consequently, it is possible to prepare (such as oxygen-sensitive, heat-sensitive, amorphous, nanomaterial) coatings which are hardly prepared by conventional spraying techniques. Proceeding from principle of cold spraying technology, various cold spraying equipment and deposition mechanism of cold sprayed coating were introduced, bonding mechanism and bonding forms (mechanical meshing, physical bonding, metallurgical bonding, chemical bonding) of cold sprayed coating were expounded. Various cold spraying equipment (high-pressure cold spraying system, low-pressure cold spraying system, vacuum-cold spraying system, laser-assisted cold spraying system, electrostatic force-assisted cold spraying system, pulsed-gas dynamic spraying system, shock tunnel cold spraying system) and corresponding research status were described. Re-

收稿日期: 2017-08-30; 修订日期: 2017-10-09

Received: 2017-08-30; Revised: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51601158); 四川省科技支撑计划(2016GZ0265); 宁波市国际合作项目(2016D10012)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51601158), Sichuan Science and Technology Support Program (2016GZ0265), Ningbo International Cooperation Project (2016D10012)

作者简介: 赵国锋(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: ZHAO Guo-feng (1992—), Male, Master, Research focus: surface engineering of material.

通讯作者: 唐鋈磊(1983—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为材料环境劣化与防护和表面工程。

Corresponding author: TANG Jun-lei (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Ph. D. tutor, Research focus: material environment deterioration & protection and surface engineering of material.

search and application progress of cold spraying technology in anticorrosive coating, wear-resistant coating, biomedicine, anti-bacterial coating, electronic industry, functional coating, repair and remanufacturing in recent years was reviewed. Finally, application and future development of cold spraying technology were prospected.

KEY WORDS: cold spray; functional coating; principle; equipment; deposition mechanism

冷喷涂 (Cold Spray) 又称为冷气动力学喷涂 (Cold Gas Dynamic Spray, 简称 CGDS), 是基于空气动力学, 采用高压气源将固态粒子带动至极高的速度撞击基板, 从而沉积形成涂层, 是一种实现材料表面多功能化的有效技术^[1]。20 世纪 80 年代, 前苏联科学院西伯利亚分院理论与应用力学研究所的科学家在风洞实验过程中偶然发现: 粒子速度超过某一速度时, 粒子对基材不再是冲蚀作用, 而是沉积在基材表面^[2]。作为涂层制备技术, 冷喷涂引起了广泛的兴趣。过去 20 年中, 关于冷喷涂的论文和专利数量快速增长, 涵盖冷喷涂在各个领域的研究和应用^[3-4]。

不同于传统热喷涂技术, 如等离子喷涂、超音速火焰喷涂等, 冷喷涂过程温度低于喷涂颗粒的熔点, 喷涂过程中颗粒不经过熔化-再凝固的过程^[5], 避免了喷涂过程中的氧化、烧损、相变等现象, 使制备氧敏感、热敏感、非晶、纳米材料等传统喷涂手段难以制备的涂层成为可能^[6]。同时, 冷喷涂技术的能源消耗低, 材料资源可回收利用, 是一种环境友好的绿色喷涂技术。

1 冷喷涂技术简介

冷喷涂技术完全基于空气动力学, 通过具有收敛-发散几何形状的拉瓦尔喷嘴, 利用压缩气体作为加速介质, 带动粉末颗粒以超过音速的速度撞击基板, 使颗粒在极高应力和应变条件下, 通过“绝热剪切失稳”引起的塑性流变或者通过剧烈塑性变形等机械过程, 实现其在工件表面上的沉积, 其主要技术目标是使颗粒加速到高于颗粒沉积的临界速度^[5]。为了保证气流对颗粒的加速效果以及对颗粒的软化效果^[7], 一般会对加速气体进行预热处理, 但预热温度远低于颗粒的熔点, 粉末颗粒仍然保持固体状态, 因此冷喷涂可以被定义为固态沉积过程^[8]。

2 冷喷涂涂层沉积机制

2.1 涂层沉积过程

冷喷涂过程中, 颗粒的撞击速度对涂层形成至关重要, 通常把颗粒可以有效沉积在基板上时的撞击速度称为临界速度, 如果冷喷涂粉末的撞击速度低于临界速度, 则会对基板产生冲蚀、反弹作用, 不能形成

涂层。

Steekiste^[9]提出冷喷涂涂层形成过程有四个阶段: (1) 基体凹变, 基体层形成; (2) 颗粒变形和位置重新排布; (3) 颗粒间金属键形成, 孔隙率降低; (4) 总体变形。而大多数人认为, 冷喷涂涂层形成过程可以归纳为两个阶段: (1) 首层粒子与基体的结合; (2) 粒子间的结合。

2.2 涂层结合机理

由于受实验手段限制, 冷喷涂中的结合机理研究仍然存在分歧。现在研究涂层结合机理主要是运用计算机技术模拟或理论计算与实验相结合的方法。

绝热剪切失稳被认为是最主流的冷喷涂结合机制, 其通常被描述为由颗粒撞击带来的温度提升效应和加工硬化之间的竞争关系。在喷涂过程中, 撞击会使晶粒结构变形、位错和滑移, 其 90% 塑性做功转化的能量来不及散失, 因此该过程常被认为是绝热的。颗粒在这种高应变下的变形特点由两个竞争因素决定: 一是后续粒子夯实带来的加工硬化, 二是由于绝热温升引起的热软化效应。当热软化作用占优时, 材料发生剪切失稳, 材料失去剪切强度并在较小的切应力下出现过度变形^[10]。

根据目前的研究进展, 冷喷涂涂层的结合方式有以下几种:

1) 机械结合。材料发生绝热剪切失稳并在压力作用下产生塑性流或金属溅流, 使材料互相产生机械结合, 形成机械互锁结构。在大多数情况下, 机械结合产生的强度占总结合强度的大部分^[11]。

2) 物理结合。绝热剪切失稳及其局部产生的射流可带走粒子和基板表面的氧化膜, 产生干净表面, 并在较高的压力下形成物理结合, 即范德华力的作用, 且当粒子和基板都能产生射流时更有利于物理结合^[12]。

3) 冶金结合。绝热剪切失稳过程中会产生大量的热能, 温度可以达到材料的熔点, 从而使界面形成冶金结合, 其发生在颗粒间、涂层-金属界面处, 需要无氧化物界面来保证金属与金属接触。冶金结合通常可以提供较高的结合强度。在实验过程中已经观察到冶金结合的证据^[13-14]。目前, 学界认为冶金结合形成的理论是由于金属射流流动从界面挤出氧化物, 以便让新鲜金属界面互相接触以达到冶金结合^[15]。例如 Cu-Cu^[16]或 Al-Al^[17]上颗粒与基底结合部分氧化物的

去除,同时颗粒和基底材料在界面区域经历着明显的热软化,从而形成金属射流,实现冶金结合。然而在硬质颗粒沉积在较软基底的情况下,例如将镍颗粒喷涂在铝基体上,颗粒变形轻微,没有金属射流形成^[18]。为此,谢迎春等^[19]在最新研究中指出,单颗粒沉积不会发生冶金结合,由于后续喷涂粒子的锤击效应将已经沉积粒子的氧化膜破坏,暴露出新鲜金属,这时由于新鲜金属碰撞才会发生冶金结合,并在实验结果中观察到了不连续金属-金属间高强度冶金结合。

4) 化学结合。在粒子塑性变形过程中,绝热升温可能诱发化学结合。Bolesta 等^[20]用铝颗粒在镍基板表面制备涂层,在结合界面处发现了厚度为0.2~0.5 nm的Ni₃Al金属间化合物,而谢迎春等^[19]将Ni颗粒喷涂到铝基板上,在界面处也发现了Ni₃Al金属间化合物。

3 冷喷涂设备

3.1 高压和低压冷喷涂系统

高压冷喷涂设备可以为加速气体提供较高的压力(通常大于1.5 MPa)以及较高的加热温度(最高可达1000℃),使可喷涂颗粒的种类更广泛,如高硬度的不锈钢粉末^[21]。

自冷喷涂技术出现开始,高压冷喷涂技术和低压冷喷涂技术几乎同时开始研发。高压冷喷涂设备中的粉体由喷嘴喉部前段附近的收缩段引入,送粉气体具有较高压力,粉体经过喷嘴喉部送入开放段加速,并喷向工件表面。该设计的优点是可使气固两相流容易集中,粉体分布均匀且沉积致密,涂层质量优良且稳定;缺点是系统结构复杂且体积庞大,不适合搬运及现场施工。为了解决这一问题,人们着手研发低压冷喷涂系统,在低压冷喷涂系统中,粉体直接被送入喷嘴喉部下游的开放段,气流带动粉体加速喷到工件表面,这样可以大大减少喷涂系统的体积,且结构简单,方便搬运,利于现场施工,但粉体流动性和均匀性不够理想,一定程度上会影响喷涂质量,由于压力和温度较低,其喷涂适用范围有很大限制^[22]。目前国外生产冷喷涂商用设备的公司有德国GGT公司、美国的ABS公司和Inovati公司、日本等离子技研公司等,其中日本Plasma Giken公司生产的冷喷涂设备PCS-1000型系统的工作气体温度可以达到1000℃,压力可以达到5.0 MPa。国内的陕西德维自动化有限公司生产的DWCS冷喷涂系统的最大工作气体压力和温度分别可以达到4 MPa和950℃,达到国际领先水平。

高压冷喷涂要求压力高于1.5 MPa,因而噪音大,噪音超过100 dB。此外,部分设备需要在氦气、氮气

或惰性气体下操作,导致生产成本高,同时高压冷喷涂设备庞大无法移动。相比之下,低压冷喷涂设备的工作气压仅为0.5~1.0 MPa,噪音小于60 dB,无火焰,无危险气体,无辐射和化学废料,可徒手操作,安全性高,且定向性好。奥柏尼斯(OCPS)粉末喷涂中心生产的Dymet®设备,具有非常低的驱动气体要求和足够低的功率要求,工作气压为0.5~1.0 MPa,可使用压缩空气、氮气、氩气、氦气等多种气体,可对金属、陶瓷和玻璃表面进行喷涂。

3.2 真空冷喷涂系统

真空冷喷涂与传统冷喷涂颗粒的加速特性相似,在传统冷喷涂设备中引入了真空喷涂室,环境压力由传统的常压减小至真空。在传统冷喷涂微纳米级颗粒的过程中发现,由于颗粒尺寸过小,喷管外形成气固两相高速流射向基体材料时,会因为气氛介质的阻碍作用而明显减速。为了解决这一问题,西安交通大学的李长久教授和杨冠军教授等^[23-24]自主研发了VCS-2000真空冷喷涂系统,该系统由真空泵、真空沉积室、气溶胶制备室、加速载气单元、载气震动送粉系统、控制系统和喷枪系统组成,实现了微纳米级颗粒的沉积。

3.3 激光辅助冷喷涂系统

在冷喷涂技术出现不久,激光技术作为辅助技术就被应用于冷喷涂,但最初激光技术是作为冷喷涂涂层的表面改性技术(激光重熔)使用的。随着研究的不断深入及冷喷涂装备的发展,现在的激光辅助技术可与喷涂同步进行,通过引入的激光能量改善颗粒和基板的力学性能,同时对颗粒具有软化效果,达到提高涂层厚度、沉积效率、致密性和结合强度,降低孔隙率的目的。同时使颗粒和基板的选材更加宽泛,实现难沉积材料涂层的制备。由于激光的特殊性质,可以对加热温度进行精确控制。甚至在一些工况下,激光辅助技术可以代替气体加热装置进行使用^[25-26]。

3.4 静电辅助冷喷涂系统

电场辅助真空冷喷涂技术是基于真空冷喷涂技术和电场辅助冷喷涂技术而提出的一项新型的喷涂技术,旨在解决传统喷涂过程中基板前段产生弓形激波造成纳米级颗粒无法有效沉积的技术难题^[27]。郑建新等人^[28]研发了相关设备并申请了发明专利。

3.5 脉冲气体冷喷涂系统

因为拉瓦尔喷嘴的结构特性影响,气体通过拉瓦尔喷嘴的开放段时,体积迅速膨胀,压力和温度随着流速的增加而迅速减小,实际喷到工件表面的气体温度已经大大降低,因此在有拉瓦尔喷嘴的冷喷涂系统

中,通过预热气体对颗粒加热并不是一种十分理想的方法。而把喷嘴设计为直筒型,使用脉冲气体作为工作气体的方法为解决问题提供了新的思路^[29]。

3.6 激波风洞冷喷涂系统

利用风洞激波技术对颗粒进行加速,从而达到沉积制备涂层的目的,其优势在于利用该技术可以把颗粒加速到极高的速度(1500 m/s),实现颗粒的沉积^[30]。由于设备庞大、结构复杂、价格昂贵,该技术仍处在实验室研究阶段。

4 冷喷涂技术应用现状

4.1 保护涂层

4.1.1 防腐涂层

冷喷涂技术可以制备致密、均匀、孔隙率低且厚度可控的涂层,为基体提供优良的腐蚀防护性能^[31-33]。李志明等^[34]利用冷喷涂技术在 SS304 基板上成功制备出了高结合强度且致密的 Ti 涂层,经过 950~1050 °C 热处理后,涂层在 3.5%NaCl 中的电化性能相当于块体 Ti,优于基体 SS304。Silva 等^[35]在碳钢表面制备 Al-Al₂O₃ 复合涂层,结果显示,冷喷涂涂层可以抵抗 3000 h 的盐雾实验,其性能优异。

4.1.2 耐磨涂层

冷喷涂技术的喷涂温度低,残余应力较低且主要为压应力,相分布均匀,可以制备单一相或具有陶瓷强化相的复合涂层,为基体提供优良的耐磨摩擦磨损及抗冲蚀保护^[36-38]。Peat 等^[39]使用冷喷涂技术在 AA5083 表面成功制备了碳化钨-钴铬复合涂层,大幅提升了基体抗磨损及抗冲蚀性能。Ni-WC 复合涂层的传统制备方法是激光熔覆技术,然而在制造过程中,材料在高温下熔化,会导致 WC 颗粒非均匀分布、WC 脱碳、热残余应力大等不良现象,造成涂层提前失效。相对于常规手段制备的 Ni-WC 涂层,冷喷涂技术制备的涂层的耐磨性更好^[40]。

4.2 功能涂层

4.2.1 生物医用

冷喷涂低温作业的特点可以用来制备生物热敏涂层,具有喷涂效率高、性价比高、可低温制备生物相容性涂层等优势,得到了生物材料研究人员的广泛关注,未来冷喷涂技术在功能化载药涂层低温制备和个性化医疗器械等方向带来了更多机遇^[41]。Cinca^[42]、Hasniyati^[43]、Kergourlay^[44]等使用冷喷涂技术在 Ti 合金表面制备羟基磷灰石涂层,以达到减少排斥反应、增加材料与生物体相容性的目的。Kim 等^[45]用冷喷涂技术制造 ZIF-8 沸石薄膜金属-有机骨架,保留了

ZIF-8 材料原始性质,并且具有极佳的抗冲击性能。另外,EL-ESKANDRANY M S 等人用冷喷涂技术沉积 Cu 基复合涂层,因其具有很强的生物抑制性,而被应用于防污抗菌领域^[46]。

4.2.2 电子工业

冷喷涂技术制备的涂层的氧含量及孔隙率极低,具有很好的机械及导热导电性能,化学成分及微观机构可与原材料保持一致,在电子工业中的应用具有很大潜力^[47]。Dardona 等^[48]将微冷喷涂结合直接写入技术(DW),实现了铜-石墨烯复合迹线沉积,迹线的导电性虽然低于块体铜金属,但这种新材料可以用于低功率电子工业领域,也可以作为增强铜耐腐蚀性能的材料使用。冷喷涂技术也被用于超导材料表面制备大热容量涂层^[49],用于增强材料的低温超导稳定性。

4.2.3 催化、电极涂层

冷喷涂制备的涂层由于高密度错位以及锤击效应,表面存在严重的塑性变形,涂层所具有的特殊结构使其可以获得更高的催化活性^[50-51]。王国强等^[52]用冷喷涂技术在铝基板上制备了 CuO/ZnO/Al₂O₃ 催化涂层,实验表明相比用其他技术制备的涂层,冷喷涂催化涂层的活性更高。Lee 等^[53]使用冷喷涂技术在露天环境下制备纳米氧化铜膜用于光电阴极,它产生的光电流密度可以达到文献记载的最高水平,而且制造成本低廉,可以大大降低生产成本。李长久等^[54-55]用真空冷喷涂技术制备纳米多孔 TiO₂ 涂层及其散射层,用于染料敏化太阳能电池(DSC),结果表明,随着气流从 3 L/min 到 7.5 L/min, N719 染料电池的短路光电流密度从 8.3 mA/cm² 增加到 9.8 mA/cm²,在 7.5 L/min 的气流条件下沉积 TiO₂ 膜的染料敏化太阳能电池,可获得 4.2% 的最大总能量转换效率。何雪龙等^[56]利用真空冷喷涂法,将纳米级 TiO₂ 在光电阳极的 TiO₂ 纳米晶体层表面制备光散射层,结果显示使用 VCS-TiO₂ 散射层的塑料敏化太阳能电池效率约提高了 23%。

4.2.4 其他功能涂层

由于冷喷涂技术的特殊优势,学者们还把冷喷涂技术运用到制备金属泡沫^[57]、热传导涂层^[58-59]、热障涂层^[60-61]、自润滑涂层^[62]以及焊接中间层^[63]等领域。

4.3 靶材

随着电子及信息产业突飞猛进的发展,溅射靶材的需求量越来越大。传统等离子喷涂技术很容易使难熔金属粉体在高温下氧化,降低了靶材品质。采用冷喷涂技术生产溅射靶材时,因喷涂温度远低于难熔金属熔点且颗粒不易氧化,所以靶材涂层中的氧含量可以控制到最小限度。与传统等离子喷涂生产的靶材相比,具有更好的细微粒度和更高的靶材密度,品质大

幅提升。庄志杰^[64]用冷喷涂技术制备的钨靶材的厚度为6 mm,密度为98%,纯度 $\geq 99.95\%$,氧含量为0.1%。徐从康^[65]用冷喷涂技术制备铜铟镓旋转靶材,纯度 $\geq 99.99\%$,相对密度 $\geq 97\%$,厚度可达到3~15 mm,氧含量 $\leq 0.02\%$ 。

4.4 修复和再制造

再制造技术作为国家新型战略性产业,高度契合了国家发展循环经济战略,得到了政府和企业的高度重视^[66]。冷喷涂技术在修复中的主要优势是可在原位实现修复,并且在修复区域无残留热应力,不会产生热膨胀现象。Astarita等^[67]使用冷喷涂技术修复商用铝发动机,结果表明,修复过的缸体硬度接近基材,耐腐蚀性能良好。

5 结语和展望

冷喷涂作为一种新型的喷涂技术,因其具有众多优势,已经被各国学者广泛关注并应用于工业。近年来,喷涂材料大大扩充,已实现陶瓷、纳米结构粉末、有机高分子材料体系涂层的制备,应用领域已经覆盖生物科学、医疗卫生、化工生产、汽车工业、航空航天、国防工业等诸多领域。冷喷涂技术的一些独特优势是传统喷涂技术不能实现的:(1)可应用于热敏基材;(2)可制备无孔、不渗透涂层;(3)可制备成分复杂的复合涂层;(4)可根据需求制备三维结构(应用于3D打印技术);(5)能够避免喷涂过程中由于热影响造成的晶体转变;(6)操作简单、安全、无热辐射、无环境污染。

冷喷涂技术虽然优势明显,但是也存在一些难以克服的缺点,比如有些颗粒硬度比较高,用低压冷喷涂设备不易沉积,而高压冷喷涂设备又过于笨重不易移动,不利于现场施工。冷喷涂技术未来发展方向应具有以下特点:(1)小型化,作为一种表面改性技术手段,可更好地适应现场工作环境。(2)应用多元化,冷喷涂技术的适用性将继续扩大,大大满足光电、医疗、航空航天、国防工业等领域对于涂层的需求。(3)兼容性,可与其他表面增材技术或者表面改性技术协同工作,完成一部分其他手段无法满足的工作,例如特殊基体焊接,可用冷喷涂技术制备焊接中间层,或者制备热敏、纳米、非晶等特殊材料的梯度涂层等。

参考文献:

- [1] 钟厉,王昭银,张华东.冷喷涂沉积机理及其装备的研究进展[J].表面技术,2015,44(4):16-20.
ZHONG Li, WANG Zhao-yin, ZHANG Hua-dong.
Research Progress of Precipitation Mechanism and

- Apparatus of Cold Spray[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 16-20.
- [2] ALKHIMOV A P, KOSAREV V F, PAPYRIN A N. A Method of "Cold" Gas-dynamic Deposition[J]. Soviet Physics Doklady, 1990, 35(10): 1047.
- [3] GRIGORIEV S, OKUNKOVA A, SOVA A, et al. Cold Spraying: From Process Fundamentals Towards Advanced Applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 268(5): 77-84.
- [4] RICHER P, YANDOUZI M, BEAUVAIS L, et al. Oxidation Behaviour of CoNiCrAlY Bond Coats Produced by Plasma, HVOF and Cold Gas Dynamic Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3962-3974.
- [5] ASSADI H, KREYE H, GÄRTNER F, et al. Cold Spraying—A Materials Perspective[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382-407.
- [6] VILLAFUERTE J. Current and Future Applications of Cold Spray Technology[J]. Metal Finishing, 2010, 108(1): 37-39.
- [7] FACCOLI M, CORNACCHIA G, MAESTRINI D, et al. Cold Spray Repair of Martensitic Stainless Steel Components[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(8): 1270-1280.
- [8] ASSADI H, GÄRTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [9] STEENKISTE T H V, SMITH J R, TEETS R E. Aluminum Coatings Via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles[J]. Surface & Coatings Technology, 2002, 154(2): 237-252.
- [10] GRUJICIC M, ZHAO C L, DEROSSET W S, et al. Adiabatic Shear Instability Based Mechanism for Particles/Substrate Bonding in the Cold-gas Dynamic-spray Process[J]. Materials & Design, 2004, 25(8): 681-688.
- [11] MORIDI A, HASSANIGANGARAJ S M, GUAGLIANO M, et al. Cold Spray Coating: Review of Material Systems and Future Perspectives[J]. Surface Engineering, 2014, 30(6): 369-395.
- [12] HUSSAIN T, MCCARTNEY D G, SHIPWAY P H, et al. Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(3): 364-379.
- [13] GRUJICIC M, SAYLOR J R, BEASLEY D E, et al. Computational Analysis of the Interfacial Bonding between Feed-Powder Particles and the Substrate in the Cold-gas Dynamic-spray Process[J]. Applied Surface Science, 2003, 219(3): 211-227.

- [14] CHOI W B, LI L, LUZIN V, et al. Integrated Characterization of Cold Sprayed Aluminum Coatings[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(3): 857-866.
- [15] BAE G, KUMAR S, YOON S, et al. Bonding Features and Associated Mechanisms in Kinetic Sprayed Titanium Coatings[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(19): 5654-5666.
- [16] LI W Y, LI C J, LIAO H. Significant Influence of Particle Surface Oxidation on Deposition Efficiency, Interface Microstructure and Adhesive Strength of Cold-sprayed Copper Coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(16): 4953-4958.
- [17] YIN S, WANG X, LI W, et al. Deformation Behavior of the Oxide Film on the Surface of Cold Sprayed Powder Particle[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 259(41): 294-300.
- [18] YIN S, XIE Y, SUO X, et al. Interfacial Bonding Features of Ni Coating on Al Substrate with Different Surface Pretreatments in Cold Spray[J]. *Materials Letters*, 2015, 138(138): 143-147.
- [19] XIE Y, YIN S, CHEN C, et al. New Insights into the Coating/Substrate Interfacial Bonding Mechanism in Cold Spray[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 125: 1-4.
- [20] BOLESTA A V, FOMIN V M, SHARAFUTDINOV M R, et al. Investigation of Interface Boundary Occurring During Cold Gas-dynamic Spraying of Metallic Particles[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2001, 470(1): 249-252.
- [21] AI-MANGOUR B, MONGRAIN R, IRISSOU E, et al. Improving the Strength and Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel for Biomedical Applications Using Cold Spray[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 216(3): 297-307.
- [22] KOIVULUOTO H, MURRAY K, KEARNS M, et al. High Pressure Cold Sprayed (HPCS) and Low Pressure Cold Sprayed (LPCS) Coatings Prepared from OFHC Cu Feedstock: Overview from Powder Characteristics to Coating Properties[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012, 21(5): 1065-1075.
- [23] WANG Y Y, LIU Y, LI C J, et al. Electrical and Mechanical Properties of Nano-structured TiN Coatings Deposited by Vacuum Cold Spray[J]. *Vacuum*, 2012, 86(7): 953-959.
- [24] FAN S Q, LI C J, YANG G J, et al. Influence of TiCl_4 Treatment on Performance of Dye-sensitized Solar Cell Assembled with Nano- TiO_2 Coating Deposited by Vacuum Cold Spraying[J]. *Rare Metals*, 2006, 25(s1): 163-168.
- [25] CHRISTOULIS D K, GUETTA S, IRISSOU E, et al. Cold-spraying Coupled to Nano-pulsed Nd-YaG Laser Surface Pre-treatment[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2010, 19(5): 1062-1073.
- [26] BRAY M, COCKBURN A, O'NEILL W. The Laser-assisted Cold Spray Process and Deposit Characterisation[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [27] TAKANA H, OGAWA K, SHOJI T, et al. Computational Simulation of Cold Spray Process Assisted by Electrostatic Force[J]. *Powder Technology*, 2008, 185(2): 116-123.
- [28] 郑建新, 刘传绍, 陈松, 等. 一种纳米级金属颗粒冷喷涂工艺: 中国, CN102747363A[P]. 2012-10-24.
- [28] ZHENG Jian-xin, LIU Chuan-shao, CHEN Song, et al. A Method for Cold Spraying Process of Nanometer Metal Particles: China, CN102747363A[P]. 2012-10-24.
- [29] JODOIN B, RICHER P, BÉRUBÉ G, et al. Pulsed-Cold Gas Dynamic Spraying Process: Development and Capabilities[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007(13): 236-242.
- [30] LUO X, OLIVIER H. Gas Dynamic Principles and Experimental Investigations of Shock Tunnel Produced Coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009(4): 546-554.
- [31] WANG Y Y, NORMAND B, MARY N, et al. Microstructure and Corrosion Behavior of Cold Sprayed SiC_p/Al 5056 Composite Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 251(8): 264-275.
- [32] WANG Y Y, NORMAND B, MARY N, et al. Effects of Ceramic Particle Size on Microstructure and the Corrosion Behavior of Cold Sprayed SiC_p/Al 5056 Composite Coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 315: 314-325.
- [33] 卢静, 王光华, 黄乐之, 等. 冷喷涂制备防腐涂层研究现状[J]. *表面技术*, 2016, 45(9): 88-94.
- [33] LU Jing, WANG Guang-hua, HUANG Le-zhi, et al. State of the Research of Cold Spraying Anticorrosion Coatings[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 88-94.
- [34] LI Z, YANG X, ZHANG J, et al. Interfacial Mechanical Behavior and Electrochemical Corrosion Characteristics of Cold-sprayed and Hot-rolled Titanium/Stainless Steel Couples[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2016, 18(7): 1240-1249.
- [35] SILVA F S D, BEDOYA J, DOSTA S, et al. Corrosion Characteristics of Cold Gas Spray Coatings of Reinforced Aluminum Deposited onto Carbon Steel[J]. *Corrosion Science*, 2016, 56: 675-684.
- [36] ASTARITA A, RUBINO F, CARLONE P, et al. On the Improvement of AA2024 Wear Properties through the Deposition of a Cold-sprayed Titanium Coating[J].

- Metals Open Access Metallurgy Journal, 2016, 6(8): 185.
- [37] GIUSTI R, VEZZÙ S, LUCCHETTA G. Wear-resistant Cobalt-based Coatings for Injection Moulds by Cold Spray[J]. Surface Engineering, 2016, 32(9): 1-9.
- [38] GOLDBAUM D, MANIMUDA P, KAMATH G, et al. Tribological Behavior of TiN and Ti(Si,C)N Coatings on Cold Sprayed Ti Substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 291: 264-275.
- [39] PEAT T, GALLOWAY A, TOUMPIS A, et al. The Erosion Performance of Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings Produced by Co-deposition Cold Gas Dynamic Spraying[J]. Applied Surface Science, 2016, 396: 282-295.
- [40] ALIDOKHT S A, MANIMUNDA P, VO P, et al. Cold Spray Deposition of a Ni-WC Composite Coating and its Dry Sliding Wear Behavior[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 308: 424-434.
- [41] 刘奕, 所新坤, 黄晶, 等. 冷喷涂技术在生物医学领域中的应用及展望[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 25-31.
- LIU Yi, SUO Xin-kun, HUANG Jing, et al. Applications and Perspectives of Cold Spray Technique in Biomedical Engineering: A Review[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 25-31.
- [42] CINCA N, VILARDELL A M, DOSTA S, et al. A New Alternative for Obtaining Nanocrystalline Bioactive Coatings: Study of Hydroxyapatite Deposition Mechanisms by Cold Gas Spraying[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2016, 99(4): 1420-1428.
- [43] HASNIYATI M R, ZUHAILAWATI H, RAMAKRISHNAN S. A Statistical Prediction of Multiple Responses Using Overlaid Contour Plot on Hydroxyapatite Coated Magnesium via Cold Spray Deposition[J]. Procedia Chemistry, 2016, 19: 181-188.
- [44] KERGOURLAY E, GROSSIN D, CINCA N, et al. First Cold Spraying of Carbonated Biomimetic Nanocrystalline Apatite on Ti6Al4V: Physical-Chemical, Microstructural, and Preliminary Mechanical Characterizations[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 19(4): 258-264.
- [45] KIM D Y, JOSHI B N, LEE J G, et al. Supersonic Cold Spraying for Zeolitic Metal-Organic Framework Films [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 295: 49-56.
- [46] EL-ESKANDRANY M S, AL-AZMI A. Potential Applications of Cold Sprayed Cu50Ti20Ni30 Metallic Glassy Alloy Powders for Antibacterial Protective Coating in Medical and Food Sectors[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016, 56: 183-194.
- [47] CODDET P, VERDY C, CODDET C, et al. On the Mechanical and Electrical Properties of Copper-Silver and Copper-Silver-Zirconium Alloys Deposits Manufactured by Cold Spray[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 662: 72-79.
- [48] DARDONA S, HOEY J, SHE Y, et al. Direct Write of Copper-Graphene Composite Using Micro-Cold Spray [J]. Aip Advances, 2016, 6(8): 109.
- [49] KRUGLOV S, AKIMOV I, KRIUKOV D, et al. Usage of Cold Spraying of High-heat-capacity Coatings for the Increase of Low- T_c Superconductors Stability[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1.
- [50] AGHASIBEIG M, MONAJATIZADEH H, BOCHER P, et al. Cold Spray as A Novel Method for Development of Nickel Electrode Coatings for Hydrogen Production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(1): 227-238.
- [51] DO V E, DOSTA S, CANO I G, et al. Acid Blue 29 Decolorization and Mineralization by Anodic Oxidation with A Cold Gas Spray Synthesized Sn-Cu-Sb Alloy Anode[J]. Chemosphere, 2016, 148(5774): 47-54.
- [52] WANG G Q, WANG F, LI L J, et al. Methanol Steam Reforming on Catalyst Coating by Cold Gas Dynamic Spray[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(4): 2391-2398.
- [53] LEE J G, KIM D Y, LEE J H, et al. Scalable Binder-free Supersonic Cold Spraying of Nanotextured Cupric Oxide (CuO) Films as Efficient Photocathodes[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(24): 15406.
- [54] FAN S Q, LI C J, LI C X, et al. Preliminary Study of Performance of Dye-sensitized Solar Cell of Nano-TiO₂ Coating Deposited by Vacuum Cold Spraying[J]. Materials Transactions, 2006, 47: 1703-1709.
- [55] YANG G J, LI C J, LIAO K X, et al. Influence of Gas Flow during Vacuum Cold Spraying of Nano-Porous TiO₂ Film by Using Strengthened Nanostructured Powder on Performance of Dye-sensitized Solar Cell [J]. Thin Solid Films, 2011, 519(15): 4709-4713.
- [56] 何雪龙, 杨冠军, 李长久, 等. 真空冷喷涂技术制备塑料染料敏化太阳能电池中 TiO₂ 散射层及其性能表征[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(2): 66-72.
- HE Xue-long, YANG Guan-jun, LI Chang-jiu, et al. Preparation and Characterization of TiO₂ Scattering Layer for Plastic Dye-sensitized Solar Cells by Vacuum Cold Spray[J]. Thermal Spray Technology, 2014, 6(2): 66-72.
- [57] VISCUSI A, AMMENDOLA P, ASTARITA A, et al. Aluminum Foam Made via a New Method Based on Cold Gas Dynamic Sprayed Powders Mixed through

- Sound Assisted Fluidization Technique[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2016, 231: 265-276.
- [58] DUPUIS P, CORMIER Y, FENECH M, et al. Flow Structure Identification and Analysis in Fin Arrays Produced by Cold Spray Additive Manufacturing[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 93: 301-313.
- [59] DUPUIS P, CORMIER Y, FENECH M, et al. Heat Transfer and Flow Structure Characterization for Pin Fins Produced by Cold Spray Additive Manufacturing[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 98: 650-661.
- [60] KARAOGLANLI A C, TURK A, OZDEMIR I. Isothermal Oxidation Behavior and Kinetics of Thermal Barrier Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spray Technique[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 318: 82-81.
- [61] 谢瑞广, 李长久, 崔红. 基于冷喷涂制备 ZrC 掺杂 NiAl 热障涂层粘结层[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 1-6.
- XIE Rui-guang, LI Chang-jiu, CUI Hong. Preparation of Cold Spraying-based NiAl/ZrC Bond Course of Thermal Barrier Coating[J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 1-6.
- [62] STARK L M, SMID I, SEGALL A E, et al. Self-lubricating Cold-sprayed Coatings Utilizing Microscale Nickel-Encapsulated Hexagonal Boron Nitride[J]. Tribology Transactions, 2012, 55(5): 624-630.
- [63] WOJDAT T, WINNICKI M, RUTKOWSKA-GORCZYCA M, et al. Soldering Aluminium to Copper with the Use of Interlayers Deposited by Cold Spraying[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2016, 16(4): 835-844.
- [64] 庄志杰. 一种以冷喷涂方法制备的难熔金属旋转溅射靶材: 中国, CN103060793A[P]. 2013-04-24.
- ZHUANG Zhi-jie. Refractory Metal Rotary Sputtering Target Material Prepared by Cold Spraying Method: China, CN103060793 A[P]. 2013-04-24.
- [65] 徐从康. 铜镓旋转靶材及采用可控气氛冷喷涂制备铜钢镓旋转靶材的方法: 中国, CN104818465A[P]. 2015-08-05.
- XU Cong-kang. Gallium Rotating Target and Preparing Copper Indium Gallium Rotating Target by Controllable Atmosphere Cold Spray: China, CN104818465A [P]. 2015-08-05.
- [66] 朱胜, 周超极. 面向“中国制造 2025”的增材再制造技术[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(3): 1-4.
- ZHU Sheng, ZHOU Chao-ji. Additive Remanufacturing for “Made in China 2025”[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(3): 1-4.
- [67] ASTARITA A, FABRIZIO C, UMBERTO P. Repairing of an Engine Block through the Cold Gas Dynamic Spray Technolog[J]. Materials Research, 2016, 19(6): 1226-1231.